

Does the proton decay?

质子会衰变吗?

梁午阳, 许甫荣*

北京大学物理学院, 北京 100871

* 联系人, E-mail: frxu@pku.edu.cn

2016-01-12 收稿, 2016-01-19 修回, 2016-01-19 接受, 2016-02-19 网络版发表

摘要 自然界中的自由中子是不稳定的, 可以衰变成质子, 同时放出一个电子和一个中微子, 平均衰变寿命大概是15 min, 可是到目前为止并没有观察到质子衰变. 本文从粒子物理标准模型(夸克、轻子、希格斯粒子为基本粒子和它们之间基本相互作用)出发, 讨论了质子衰变的可能性. 建立在标准模型基础上的大统一模型给出了质子寿命的下限. 文章同时介绍了目前实验给出的质子衰变寿命下限.

关键词 质子衰变, 标准模型, 大统一理论

我们知道, 物质是由原子或分子组成, 原子又是由原子核和电子构成的, 除了气(质子数为1, 中子数为0)之外的原子核都是由质子和中子组成. 在原子核层次, 质子和中子存在许多相似的物理特性, 例如自旋都为1/2、非常接近的质量等. 但是它们的稳定性却有很大的差别. 在原子核内部, 中子是很稳定的, 但是一个自由的中子却是很不稳定的, 它的寿命大概是15 min, 衰变成质子, 同时放出电子和中微子. 那么质子的稳定性会不会也和中子一样, 能衰变吗?

自由的质子在自然界中是很常见的. 一个最典型的例子就是氢(质子数为1, 中子数为0)离子(H^+). 在宇宙星系中, 大部分物质都是以氢离子和电子组成的热的离子气体存在, 即等离子体. 在化学实验室, 常见的酸性溶液也包含了大量的氢离子. 如果自由质子能够像自由中子一样能发生衰变, 那么上面所说的宇宙星系和化学实验室里的酸性溶液都将不能稳定存在. 但是实际上质子构成的等离子体一直存在着, 我们在化学实验室也并没有碰到酸性溶液不稳定的情况. 不管质子是在原子核内部或者以自由的形式存在, 质子看起来都相当稳定.

在粒子物理标准模型里面, 组成物质的基本粒

子分为自旋为1/2的费米子、自旋为1的规范玻色子和自旋为0的希格斯粒子. 其中自旋为1/2的费米子包括三代夸克及其反粒子、三代轻子及其反粒子. 质子和中子的组成部分就是夸克家族里面的上夸克(u)和下夸克(d). 夸克拥有一种叫作重子数(B)的量子数. 夸克的重子数为1/3, 反夸克重子数为-1/3. 质子(由2个u夸克和1个d夸克组成)和中子(由1个u夸克和2个d夸克组成)的重子数都是1. 三代轻子包含电子 e^- 及其对应的中微子 ν_e , μ 子及其对应中微子 ν_μ , τ 子及其其中微子 ν_τ , 还有它们对应的反粒子. 轻子也携带一个量子数叫作轻子数(L). 所有轻子携带轻子数为1, 反轻子携带轻子数为-1.

基本的物理过程总是要遵循一定的对称性和守恒律, 比如: 重子数和每个家族的轻子数在强相互作用、弱相互作用以及电磁相互作用框架下都是守恒的. 其他的守恒物理量还有能量、电荷等. 根据著名的质能关系 $E=mc^2$, 质量小的物质拥有较少的能量, 大质量的物质有较多的能量. 所以如果没有从外界吸收能量, 一个小质量的粒子不可能自发变成较大质量的粒子. 例如电子是非常稳定的, 就是因为没有一个比一个电子质量还小的携带一个负电荷的粒子存在.

引用格式: 梁午阳, 许甫荣. 质子会衰变吗? 科学通报, 2016, 61: 1063-1065

Liang W Y, Xu F R. Does the proton decay (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2016, 61: 1063-1065, doi: 10.1360/N972016-00049

一个自由的中子可以衰变成为一个质子、一个电子和一个反电子中微子 $\bar{\nu}_e$ 。在这个过程中，能量(质量)、电荷、重子数、电子轻子数都是守恒的。中子比质子重了一点(大约0.7 MeV)。质子是迄今为止发现的重子数为1的最轻的粒子。虽然它也有层次结构(由夸克组成)，但是重子数守恒保证了它不能衰变成更小的粒子。

物理学家总是追求基本和简单统一的理论。在4种基本相互作用(电磁相互作用、万有引力相互作用、强相互作用、弱相互作用)发展历史上，麦克斯韦将电和磁统一为经典的电磁场理论。爱因斯坦曾试图将电磁力和引力统一描述，但是没有成功。温伯格、萨拉姆和格拉肖将电磁相互作用和弱相互作用统一，建立了规范量子场的电弱统一理论。物理学家们设想这个过程可以继续下去。一种可能的途径是将电弱理论和描述强相互作用的量子色动力学统一起来，形成所谓的大统一理论——GUTs (grand unified theories)。当我们谈及相互作用的统一时，都有一个适用的能量范围。实际上现实生活中，4种相互作用的区分是很明显的。但在能量很高的情况下，这些相互作用可以遵循统一的规范对称性，具有相同的作用强度和统一的规范玻色子。但在较低的能量区，对称性自发破缺，表现为不同的对称性、不同的作用强度和不同的交换玻色子特性，对应于几种不同的相互作用。图1就是一个例子，它表明大约在能量100 GeV时，电磁和弱相互作用可以用统一的理论描述，在能量约 10^{15} GeV时，强和电弱作用可以统一描述。

大统一理论有一个很有趣的结论，就是轻子和夸克可以直接耦合，也就是说在 10^{15} GeV能区，轻子和夸克实际上是同类粒子，可以相互转化，轻子数和重子数不再分别守恒，而应该统一考虑(B-L守恒)。这时，夸克可以通过发射一种所谓的X粒子直接衰变成轻子($q \rightarrow X+l$)。这就意味着质子在这个能区可

以衰变。按照X粒子的质量为 10^{15} GeV，可以估算出质子的寿命是 10^{31} 年量级。虽然这个寿命很长，但还是可以实验测量的。例如用边长20 m的立方体容器装满水，其中的质子可以达到 10^{33} 个，这样可以期望每天应该有一个质子发生衰变。但是经过大量的实验，人们并没有观测到质子衰变。这说明实际上质子寿命比 10^{31} 年还要长。在很长的一段时间，质子衰变实验曾是一个热点问题。最近利用日本的超级神冈探测器(Super-Kamiokande)，通过反 μ 子衰变测量，给出质子寿命 6.6×10^{33} 年，通过正电子衰变测量给出质子寿命下限为 8.2×10^{33} 年^[2]。最新的通过正电子衰变实验给出质子寿命不应小于 1.29×10^{34} 年(<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/whatsnew/new-20091125-e.html>)。2014年通过寻找K介子衰变，给出了一个下限大概是 5.9×10^{33} 年，这个结果和超对称(SUSY)预言的 10^{34} 年非常接近^[3]。

通过对质子衰变的探索，可以对现实生活以及宇宙物质的基本存在有一个更深入的认识。设想如果现实生活中质子可以衰变，我们的生活将会发生很大的改变，现有的知识也将会受到很大的冲击。

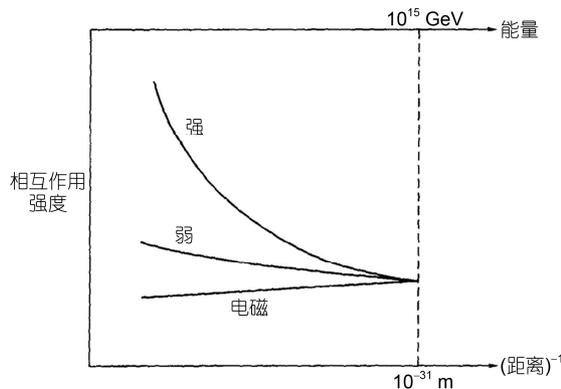


图1 相互作用强度随能量的变化^[1]
Figure 1 The variation of interaction strength with energy^[1]

参考文献

- 1 Lu X T. Nuclear Physics (in Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 2000 [卢希庭. 原子核物理. 北京: 原子能出版社, 2000]
- 2 Nishino H, Clark S, Abe K, et al. [Super-K Collaboration]. Search for proton decay via $p \rightarrow e^+ \pi^0$ and $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$ in a large water Cherenkov detector. Phys Rev Lett, 2009, 102: 141801
- 3 Abe K, Hayato Y, Iyogi K, et al. [Super-K Collaboration]. Search for proton decay via $p \rightarrow \nu K^+$ using 260 kiloton-year data of Super-Kamiokande. Phys Rev D, 2014, 90: 072005

Does the proton decay?

LIANG WuYang & XU FuRong

School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

The free neutron is unstable. It can decay into a proton with emission of an electron and an electron antineutrino. The mean lifetime of the free neutron is about 15 minutes. In contrast, the free proton seems stable. To date, no proton decay has been observed. In this article, we discuss the possibility of proton decay within the Standard Model which describes the elementary particles and their interactions. With the grand unified theory that describes the elementary particles and fundamental interactions in higher energy range, we discuss the possibility of the proton decay. Some of theoretical predictions for free proton decay in extremely high energy range are given and compared with the estimated lower limits of the lifetime in recent experiments of the possible free proton decay.

proton decay, standard model, grand unified theory

doi: 10.1360/N972016-00049



许南荣

浙江省嘉兴市嘉善县人。1993年获得北京大学博士学位。1995~1997年瑞典皇家理工大学博士后，1997~2000年英国 Surrey 大学博士后。现任北京大学教授、博士生导师、中国-美国奇特核物理理论研究所(CUSTIPEN)执行主任、北京大学-兰州重离子国家实验室联合核物理中心主任、核物理与核技术国家重点实验室副主任、Surrey 大学客座教授，获国家杰出青年科学基金。